

汽车驾驶模拟器在交通研究中的应用

Driving Simulator in Transportation Research

唐克双¹, 王亚晴², 王鹏飞³

(1.同济大学交通运输工程学院,上海 201804;2.国家知识产权局专利局专利审查协作中心,北京 100190;3.河北科技师范学院城市建设学院,河北 秦皇岛 066000)

TANG Ke-shuang¹, WANG Ya-qing², WANG Peng-fei³

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Patent Examination Cooperation Center of SIPO, Beijing 100190, China; 3. Institute of Urban Construction, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao Hebei 066000, China)

摘要: 依托先进的工业技术,日本在汽车驾驶模拟器领域积累了大量经验。首先回顾了汽车驾驶模拟器的发展历程及基本应用。然后以日本东京大学生产技术研究所“面向人、车、交通研究的通用驾驶模拟器”为例,着重从驾驶行为、道路与交通设计、交通安全、交通环境效益以及智能交通系统几方面阐述了汽车驾驶模拟器在交通研究上的应用。最后探讨了汽车驾驶模拟器在中国交通研究中的应用前景。

Abstract: Japan has gained a great deal of experience in Driving Simulator (DS) with the advanced industrial technologies. This paper first reviews the development and application of driving simulator. Then, taking the Universal Driving Simulator for Human, Vehicle, and Traffic Research developed by Institute of Industrial Science, the University of Tokyo as an example, the paper discusses using driving simulator to study driver behavior, road and traffic design, traffic safety, and intelligent transportation system. Finally, the paper discusses the future utilization of driving simulator in transportation research in China.

关键词: 汽车驾驶模拟器; 实验交通工程; 驾驶行为; 智能交通

Keywords: driving simulator; experimental traffic engineering; driver behavior; intelligent transportation system

中图分类号: U491.2⁺5 文献标识码: A

收稿日期: 2010-11-12

作者简介:唐克双(1980—),男,安徽宣城人,博士,副教授,主要研究方向:驾驶行为、交通控制、交通仿真、实验交通工程。E-mail:tang@tongji.edu.cn

0 引言

近几年,驾驶模拟器(Driving Simulator, DS)的开发、研究以及应用在中国可谓是方兴未艾。根据模拟对象不同,主要有飞行器DS、列车DS和车辆DS。本文仅讨论汽车DS,下文出现的DS也特指汽车DS。DS涉及的专业领域包括车辆动力学、计算机、电子、图像学、声学、心理学和交通等。依托在上述领域的先进工业技术,日本在DS的研发与运用方面处于世界领先地位^[1]。DS不仅在汽车设计与制造方面是不可或缺的有效工具之一,在交通研究方面同样可以发挥重要作用。了解日本的成功经验对中国DS的发展具有很好的参考价值。

本文以东京大学生产技术研究所“面向人、车、交通研究的通用驾驶模拟器”(Universal Driving Simulator for Human, Vehicle, and Traffic Research)为例,阐述DS在交通研究上的应用。同时,本文也系统地回顾了DS的发展历程及基本应用,并探讨其在中国交通研究中的应用前景。

1 DS概述

1.1 定义及分类

简单地说,DS是指利用计算机、机电、车辆、软件、声音和图像等复合技术手段来模拟现实驾驶环境的仿真平台。DS一般由车辆动力学装置、驾驶座舱、图像生成系统(显示屏等)和声音合成系统等构成。根据动力学装置的特点以及驾驶座舱与显示屏

之间的相对运动关系，本文将DS分为零自由度DS、低自由度DS和高自由度DS三类。

零自由度DS是指驾驶座舱和显示屏都是固定的，不能根据被试者对方向盘、离合器和油门等部件的操作而相应移动。零自由度DS又可细分为被动式和主动式两类。在被动式DS中，显示屏中的画面是事先设定的场景，不能根据被试者的驾驶操作以及车辆状态而变化。在主动式DS中，各部件上安装的传感器可以采集被试者的驾驶操作信号，对信号进行处理后，根据车辆动力学理论计算出车辆的状态(例如转弯角度、速度和位置等)，然后将计算出的车辆状态信息输入声音和图像生成系统，更新模拟驾驶环境。

低自由度DS(自由度为1~2)是指驾驶座舱可以在水平方向上前后左右移动，同时，显示屏协同移动以提供不同角度的图像。它是在主动式DS的基础上增加液压伺服装置，从而使驾驶座舱根据被试者的驾驶操作而对应移动，被试者便产生真实驾驶的感觉。

高自由度DS(自由度大于等于3)是指驾驶座舱可以在前后、上下和左右6个方向上移动，图

像显示屏也可对应移动并更新各角度下的图像。部分高自由度DS还可实现驾驶座舱在XY, XZ和YZ面的自身回转，最大可实现9个自由度上的运动，以提高车辆转弯时的驾驶真实感和舒适度。

1.2 发展历史

从20世纪70年代早期德国大众开发的小型3自由度DS到2007年日本丰田开发的世界上规模最大的6自由度DS，DS的发展已有近40年的历史。表1按照时间顺序，列举了世界上主要研究型DS的开发年代和机构^[2]。

1.3 基本应用

DS广泛应用于驾驶培训。很多研究显示，DS是一种非常经济、安全和有效的训练工具，不但可以设置各类实际驾驶培训中很少遇到的意外场景，还可记录受训人员在各类场景下的驾驶操作和反应，而且可以减少受训人员的紧张感，从而提高驾驶培训质量。

DS在研究上的应用也很广泛，应用领域包括汽车设计与制造、道路与交通工程、城市景观设

表1 世界上主要研究型DS的开发年代和机构

Tab.1 Major driving simulators for research purpose in the world and their developers

开发年代	开发机构	备注
20世纪70年代早期	德国大众(Volkswagen)	3自由度,世界上最早的DS
1984	瑞典国家道路和运输研究所(VTI)	4自由度,2004年加入座舱的90度回转功能
1985	德国戴姆勒-奔驰(Daimler-Benz)	6自由度,1993年扩大座舱的侧向移动范围
1985	日本马自达(Mazda)	4自由度
1994	美国福特(Ford)	6自由度
1999	德国宝马(BMW)	6自由度,2003年重新扩建
1999	日本日产(Nissan)	6自由度
2002	美国爱荷华大学(Iowa University)	9自由度
2004	日本东京大学(University of Tokyo)	7自由度
2004	法国雷诺(Renault)	6自由度
2004	西班牙国家航宇技术研究所(INTA)	6自由度
2006	英国利兹大学(Leeds University)	9自由度
2007	日本丰田(Toyota)	7自由度

计以及心理学等。研究型DS一般模拟精度和自由度都比较高。

DS也常被应用于电子游戏和游乐场所。虽然此类DS的自由度一般较低,但为了提高游戏和娱乐质量,通过采用各种技术,其模拟真实感往往可以达到很高的程度。

2 东京大学DS

下面以东京大学生产技术研究所智能交通中心(以下简称ITS Center)开发的DS为例,在对其开发历程、系统构成以及技术参数等作详细说明的基础上,结合一些实际研究课题,介绍DS在交通研究上的应用。

2.1 开发历程、系统构成和技术参数

表2概括了东京大学DS的三个主要开发历程

表2 东京大学ITS Center人、车、交通研究通用型驾驶模拟器的开发历程

Tab.2 Development history of the Tokyo University Driving Simulator for Human, Vehicle, and Traffic Research

开发阶段	主要特征
	<ul style="list-style-type: none"> • 6自由度动力学平台的建造 • 多体车辆动力学模型的采用 • 与轮胎测试机的结合 • 半实物仿真(Hardware In the Loop Simulation)的引入 • 驾驶舒适度评价的运用
	<ul style="list-style-type: none"> • 360°回转功能的引入 • 复合现实感交通试验场的构建 • 与交通仿真软件的结合 • 360°全视角及后视镜图像生成 • 实景影像和计算机图形的结合 • 实车刹车系统的采用
	<ul style="list-style-type: none"> • 驾驶座舱回转中心的移动 • 显示屏的扩大 • 分割安装技术的采用 • 声音系统的改进 • 目标投影仪技术的采用 • 车辆转弯软件的升级

及各阶段产品的主要功能。1999年,东京大学联合日本三菱和松下等企业,开发了以综合研究为目的的虚拟试验场(Virtual Proving Ground),之后五年里,其功能得到不断改进,2004年正式被改称为第一代“面向人、车、交通研究的通用驾驶模拟器(Universal Driving Simulator for Human, Vehicle, and Traffic Research,简称Universal Driving Simulator I)”;2004—2007年,第一代DS的功能得到升级,2007年开始改称为Universal Driving Simulator II(东京大学第二代通用DS),表3和表4详细介绍了其主要系统构成和技术参数^[3]。

2.2 主要特点

与世界上其他研究型DS相比,东京大学第二代通用DS主要有以下几方面的特点^[3]:

1) 利用外部软件,根据严密的动力学方程,评估车辆悬架,计算车辆的状态,同时,与轮胎

试验机相结合，采用“硬件在环”仿真技术(见图1)，实时测试和评价轮胎表现以及速度和气压等的影响。

2) 采用目标投影仪(Target Projector)技术，见图2，提高显示屏中心目标区域的解像度。通过该项技术，被试者可以识别在一般显示屏上难以区分的交通标志，因而在测试交通信息发布系统时，DS可发挥相应作用。

3) DS座舱可配合被试者的转弯操作信号，在XY面上进行360°回转，同时，DS图像生成系统可根据座舱的旋转角度实时提供当前角度下的图像，以提高车辆转弯时的驾驶真实感，减少被试者的晕动病(常见的晕动病有晕车和晕船等)。另

外，第二代DS座舱的回转中心从原先的驾驶人座位正下方水平移至驾驶人座位的左后方，以提高车辆转弯操作时驾驶人的舒适感，见图3。

4) 搭载车辆导航系统(见图4)，提供模拟驾驶车在路网中的精确位置，同时配备声音提示系统，在模拟驾驶车接近某些特殊位置(例如事故多发地带和急转弯处)时，系统会向驾驶人发出声音警告。DS的这一功能可用来测试和评价开发中的安全驾驶辅助系统和交通信息发布系统的功能。

5) 声音合成系统(见图5)可以合成驾驶过程中车内的各种声音(如路面噪声、引擎声音和风声等)、其他车辆靠近或者合分流时的声音以及在隧道中行驶时的回音效果等。在合成声音时，系统

表3 东京大学 Universal Driving Simulator II 的主要系统构成及部件

Tab.3 System structure and key components of Universal Driving Simulator II developed by University of Tokyo

主要系统	主要部件	备注	
图像显示系统	图像投影装置	液晶投影仪	
	计算周期	1/60 s	
	解像度	XGA(1 024×768 像素)	
	视角范围	水平 360°, 垂直 30°	
全方位屏幕尺寸			宽 2 683 mm, 高 3 160 mm
6 自由度动力学装置	电动 6 轴 Stewart 平台(6 自由度)		
	最大负荷量	3 000 kg	
360°回转装置	各方向的最大速度、角速度、加速度		见表 4
	Yaw 角速度	60 (°)·s ⁻¹	
模拟驾驶器底座	Yaw 角加速度	300 (°)·s ⁻²	
	尺寸	长 3 200 mm, 宽 3 540 mm, 高 3 417 mm	
声音效果	样式	机动车样式, 可调式座位, 体动冲击波(body Sonic)震动模拟	
	引擎声音、道路噪声、风声、撞击声等		

表4 东京大学 Universal Driving Simulator II 6 自由度动力学移动装置的技术参数

Tab.4 Specifications of 6 degree of freedom dynamic moving machine of Universal Driving Simulator II developed by University of Tokyo

变量	最大变位	最大速度	最大瞬间加速度
X	-300~+250 mm	330 mm·s ⁻¹	0.5G(G 为重力加速度)
Y	±260 mm	350 mm·s ⁻¹	0.5G
Z	-400~+290 mm	380 mm·s ⁻¹	0.5G
Roll	±20°	23 (°)·s ⁻¹	
Pitch	-18°~+20°	21 (°)·s ⁻¹	
Yaw	±17°	22 (°)·s ⁻¹	

还可考虑DS座舱的回转，从不同角度提供接近现实的声音效果。另外，驾驶过程中也可模拟车辆的自身震动效果，以提供更加贴近现实的驾驶感觉。

6) 通过自主开发的微观仿真软件(KAKUMO)，实现了DS与交通仿真软件(Traffic Simulator, TS)之间的数据交换。DS和TS的融合使得分析各种设定交通条件下的驾驶行为以及评价其所导致的交通安全和效率成为可能。为便于理解TS, KAKUMO以及DS三者之间的关系，表5总结了其不同之处^[4]。

3 DS在交通研究中的应用

DS之所以被广泛应用于研究，主要因为有以下几个优点：1)针对同一被试者，可以呈现多种

多样的驾驶环境；针对同一驾驶环境，可以采用多名被试者。2)相比室外实验，基于DS的实验在空间及时间上的制约比较小，实验费用较低。3)在任何危险的驾驶环境下，都不会出现事故，即使发生事故也不会造成生命财产损失。

下文主要结合一些利用东京大学DS完成的研究项目，从驾驶行为、道路与交通设计、交通安全、交通环境效益以及智能交通系统等五个方面，简要阐述DS在交通研究上的应用。

3.1 驾驶行为研究

利用DS可以对一些在现实世界中不可能或者很难进行实验的驾驶行为进行分析和研究。例如，2005年，文献[5]利用东京大学DS完成了信号控制交叉口信号相位切换时产生的两难区(Dilemma Zone)内的驾驶行为研究。研究人员首先利用DS的图像生成系统构建由不同规模和信号

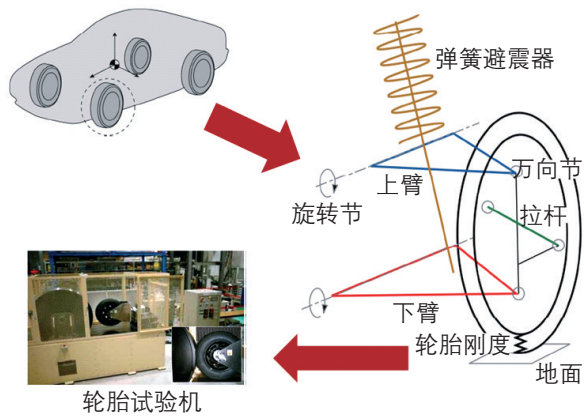


图1 车辆多体动力学模型及其与轮胎试验机的结合
Fig.1 Integration of vehicle dynamics model and tire testing machine

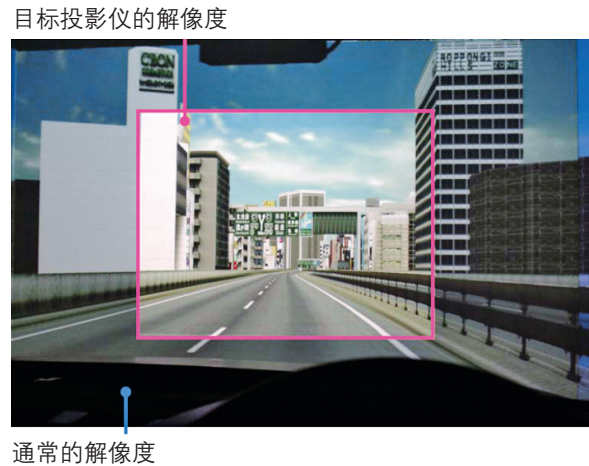


图2 目标投影仪技术
Fig.2 Target projector technology

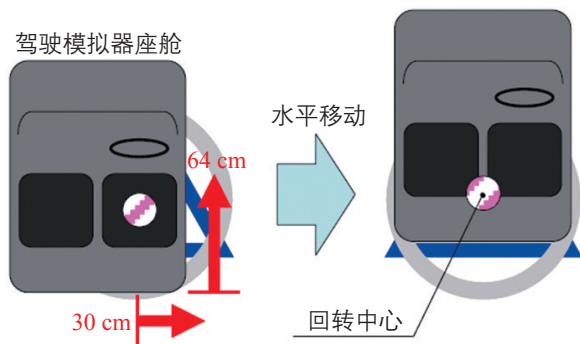


图3 座舱回转中心的移动
Fig.3 Shift of cabin



图4 车载导航系统
Fig.4 Car navigation system

控制参数的交叉口组成的虚拟路网，并使被试者在虚拟路网中驾驶通过各个交叉口，然后分别在被试者控制的目标车辆刚进入两难区、到达两难区中间位置以及即将驶出两难区三个时间点开启黄灯，记录被试者停车或者通行的决策结果以及各种行为参数(包括反应时间、速度、加减速度等)。实验结束后，对被试者在上述各种条件下的心理进行问卷调查，以帮助解释实验结果。

文献[6]利用DS分析驾驶人对不同的交通信号灯显示顺序的认知度。该研究通过在DS图像系统中设置各种信号灯组合和显示顺序，记录被试者在不同情况下对绿灯启亮的反应时间。通过比较同一被试者在不同条件下和不同被试者在相同条件下的反应时间，以及实验后对被试者的问卷调查，来评价各种信号灯显示方案的优劣。

3.2 道路与交通设计方案评价

DS在道路与交通设计上的运用，主要是在前期测试驾驶人在不同设计方案下的驾驶状态和接

受程度，从而对各方案进行事前的效率性和安全性评估。例如，2009年文献[7]利用东京大学DS对日本高知县高速公路上的部分易发拥堵路段，进行了车道线重新设计后的驾驶行为分析以及路段通行能力评价。研究者利用DS跟踪记录了不同驾驶熟练程度的被试者对新车道线的各种反应，包括认知度、适应性和行驶速度等，通过这些指标评价不同车道线改善方案的安全性和路段通行能力。

文献[8—9]利用DS测试不同道路纵断面和横断面设计方案对行车速度和安全的影响等。大部分现代研究型DS不仅可以再现车辆在水平方向上的移动，而且可以模拟车辆在纵向的运动状态，甚至纵向的震动效果。因此，研究者可通过对被试者的行车速度和驾驶动作的精确记录来分析不同的断面设计方案。

3.3 交通安全研究

鉴于无交通事故和无生命财产损失风险的特

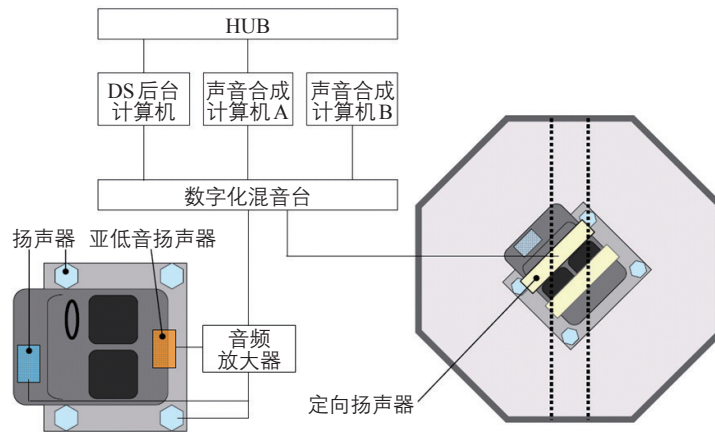


图5 声音合成系统

Fig.5 Acoustic sensation system

表5 交通仿真软件、微观仿真软件以及驾驶模拟器三者之间的差别

Tab.5 Comparison on traffic simulator, microscopic simulation software, and driving simulator

项目	交通仿真软件(TS)	微观仿真软件(KAKUMO)	驾驶模拟器(DS)
网络规模	广域(半径:几百米~几千米)	交通仿真网络中DS所在区域	驾驶人视野范围内的区域
时间步长/s	1	1/20	1/60
路网精确度	1 m	1 cm	1 cm
车辆移动	基于交通流理论	基于加速度和速度	基于驾驶人的操作状态
车辆位置	(路段—车道—到停车线的距离)	(路段—车道—坐标)	空间地理坐标(X, Y, Z)
路径选择	嵌入的动态路径选择算法	由交通仿真软件导引	

点, DS在交通安全研究上的运用尤其广泛。例如, 2006年文献[10]利用DS对路边停车场设计的安全性进行评价, 结果显示, 路边停车场的位置、宽度和出入口的设计等都会对路段上的交通流产生影响。该研究将TS和DS相结合, 首先在TS中生成不同交通量条件下的路段交通流, 然后将生成的交通流通过DS的图像生成系统进行再现, 并由被试者控制其中一辆车进行驶入和驶出路边停车场的行为, 同时分析记录各种情况下周围其他车辆的速度和轨迹变化, 从而评价各停车场设计方案。

国际上基于DS的交通安全研究更多的是关于交通事故的分析。例如, 文献[11]利用DS分析了事故未发生状况下的临界撞击时间(Time-to-Collision)和事故发生前驾驶人的回避行为以及事故发生时的碰撞强度等。与前述研究类似, 研究者在DS中设置各种接近现实的危险场景, 并由被试者控制其中的目标车辆, 详细收集各种场景下被试者的操作信号(加减速和刹车等)和目标车辆状态参数(时间、速度和位置等)。最后, 利用这些信息分析事故发生前后的危险程度。

3.4 环境效益评估

利用DS可全面掌握被试者在特定驾驶环境下的所有驾驶操作以及车辆状态信息。通过这些信息, 可非常精确地建立驾驶特性、交通流状态与车辆尾气排放的关系模型, 从而评估城市交通的环境效益, 并研究环保的驾驶方式。例如, 2009年文献[12]利用东京大学DS研究了不同道路线形、坡度、交叉口密度、交通拥挤程度、信号周期以及绿信比等条件下的驾驶操作和车辆状态。研究者同样采用DS和TS相结合的方法, 首先利用TS在宏观层次上再现实际的交通流状态(标定的TS模型在交通量和行程速度等宏观指标上和实际接近), 然后在DS中将由被试者驾驶的目标车辆置入生成的交通流环境, 全程记录目标车辆及其周围交通流的各种状态参数, 进而采用车辆尾气排放模型计算不同驾驶方式和交通流条件下的尾气排放量。最后, 在总结尾气排放少的驾驶方式的基础上, 向公众推荐“绿色驾车方式”。

3.5 智能交通系统的开发

DS和TS与车载导航系统的结合, 使得在DS平台上实验新开发的智能交通系统成为可能。例如, 2009年文献[13]完成了“基于免疫系统的车辆间协调控制的危险回避系统的开发”课题研究。在由DS, TS和KAKUMO组成的东京大学DS复合平台上, TS可生成各种交通流条件, 安装在DS上的车载导航系统可明确实验车所在的位置, 微观仿真软件KAKUMO可实现实验车和周围车辆之间的通信。以上三个功能的有效组合使研究者可以对几乎不可能在现实环境中进行测试的车辆危险回避系统进行完整再现, 并评价其功能。

4 DS在中国交通研究中的应用前景

目前, 中国很多大学和研究机构也在积极开发或者引进研究型DS。在交通领域一些基础性研究依然缺乏的情况下, DS可在以下两方面交通研究上发挥积极作用。

1) 适合中国国情的基本驾驶行为模型的开发或参数标定。中国现有的各类道路通行能力手册、交叉口规划与设计指南以及交通控制规范等还较多地采用国外的研究成果, 如最基本的跟车模型、超车模型、匝道分合流模型以及其他驾驶行为参数。这些基础性研究一方面需要大量的实测数据支撑, 另一方面需要有科学的实验交通工程方法。DS可以帮助分析驾驶人、车辆、道路设施三者之间相互作用的复杂机制, 研究驾驶人在复杂驾驶环境下的心理与行为, 以及驾驶人对交通环境和载运工具的适应性。

2) 混合交通条件下的交通安全研究, 特别是城市道路的交通冲突和事故分析。在世界范围内, 中国交通事故死亡人数依然居高不下。原因包括机非混合的交通环境、交通设计与交通行为的脱钩以及相对薄弱的交通法规意识等。利用DS可实现对交通冲突或事故中人的因素与反应以及道路设施特性、交通环境、人机界面等与驾驶人心理和行为关系的研究。对人、车、路三者之间复杂关系的理解, 可帮助改善交通控制和设计的

安全性，同时制定更加有针对性的交通安全措施。

必须指出的是，科学有效地实施上述研究，需要构建一个以DS为中心的复合交通实验平台，不仅要融合DS和TS，还需要与交通实验车和交通实验场等有效配合。中国实验交通工程的发展依然处于初级阶段，对DS的研究、开发和应用将大力提升实验交通工程的研究水平，进而推动整个交通工程专业的发展。

参考文献：

References:

- [1] 松田克巳. 驾驶模拟器在日本的应用与现状[J]. 交通与运输, 2008, 24(6): 34-35.
- [2] Slob J J. State-of-the-Art Driving Simulators, a Literature Survey [R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2008.
- [3] Yamaguchi D, Suda Y, Onuki M, et al. Improvement of Realistic Sensation on Universal Driving Simulator[C]// INRETS. Proceedings of the 15th ITS World Congress on Intelligent Transportation Systems. Arcueil: INRETS, 2008: 267-275.
- [4] Shiraishi T. Development of a Microscopic Traffic Simulation Model for Interactive Traffic Environment[EB/OL]. 2004[2010-11-12]. <http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/kuwahara/publications/2004-002.pdf>.
- [5] Oda T, Suda Y, Tanaka S, et al. Evaluation of Stopping Behavior of Drivers in Dilemma Zone Using Driving Simulator [J]. International Journal of ITS Research, 2007, 5(1): 47-54.
- [6] Knodler M A, David A Noyce, et al. Evaluation of Traffic Signal Displays for Protected-Permissive Left-Turn Control Using Driving Simulator Technology[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(4): 270-278.
- [7] 片岡源宗, 熊谷靖彦, 中川敏正, 山口大助, 田中伸治. ドライビングシミュレータを用いた国道32号渋滞緩和策の安全性検証[DB/CD]. 東京: 日本の土木学会, 2009.
- [8] Montella A, Aria Massimo, et al. Perceptual Measures to Influence Operating Speeds and Reduce Crashes at Rural Intersections: Driving Simulator Experiment[J]. Transportation Research Record, 2010(2149): 11-20.
- [9] Briand P, Anceaux Françoise, et al. Impact of Perceptual Treatment on Driver's Behavior: From the Driving Simulations Studies to the Field Tests - First Results [DB/CD]. Washington DC: Transportation Research Board, 2010.
- [10] 田中伸治, 桑原雅夫. 複合現実感交通実験スペースを用いた路上駐車場所の安全性評価[J]. 生産研究, 2007, 59(3): 30-33.
- [11] Brown T L, Lee John D, McGehee Daniel V. An Attention-Based Model of Driver Performance in Rear-End Collision Situations [J]. Transportation Research Record, 2001(1724): 14-20.
- [12] 市原隆司. ドライバ状態推定によるエコドライブの研究 [D]. 東京: 东京大学, 2009.
- [13] 結城知彦, 森正嘉, 鈴木高宏, 國井康晴. 免疫ネットワークを用いた車両間協調によるリスク回避システムの構築 [DB/CD]. 東京: 日本ロボット学会, 2009.
- [4] 2000[2011-02-12]. http://www.ptvamerica.com/fileadmin/files_ptvamerica.com/library/2000%20TRIBUT%20Bicriterion%20Equilibrium%20Assignment.pdf.
- [5] Transport for London. Charging Zone Maps and times [EB/OL]. 2011[2011-02-12]. <http://www.tfl.gov.uk/tfl/roadusers/congestioncharge/whereandwhen/detailMapECCZ.jpg>.
- [6] Karlsruhe- Amt fuer Stadtentwicklung - Statistik - Flaechе, Bevoelkerung und Einwohnerdichte der Stadtteile und Stadtviertel [EB/OL]. 2011[2011-02-12]. <http://www1.karlsruhe.de/Stadtentwicklung/afsta/Statistik/Index.htm>.

(上接第64页)